

熱伝導と放射冷却を含めた銀河団プラズマのMHD数値実験

浅井 直樹（千葉大自然） 福田 尚也（岡山理大） 松元 亮治（千葉大理）

ABSTRACT

近年のX線観測により、銀河団中心部の温度は周囲に比べて2分の1から3分の1程度に下げ止まっていることがわかっている。その温度分布を説明するためには、放射冷却と熱伝導を含めた計算が必要である。低密度プラズマでは熱伝導率は等方ではなくなり磁力線方向に伝わりやすくなる。そこで、放射冷却と非等方熱伝導を含めた2次元MHDシミュレーションにより銀河団コアの熱的安定性を調べた。初期に乱流磁場を与えたシミュレーションの結果、銀河団コアへの熱供給が、熱伝導の非等方性を考慮しない場合に比べて抑制され、高温領域と低温領域が共存できること、銀河団コアは1Gyr以上間保たれることができた。

1. Introduction

近年のX線観測により、銀河団中心部の構造が明らかになり、多くの銀河団において、その中心部の温度は周囲に比べ、 $1/2 \sim 1/3$ 程度に下げ止まっていることがわかった。この銀河団プラズマの温度分布を説明するためには、放射冷却とバランスする中心部へのエネルギー輸送や加熱が必要と考えられており、AGNジェットや周囲からの熱伝導による加熱などがその候補と考えられている。熱伝導の振る舞いは磁場存在下では磁力線方向に依存するため、磁場を考慮した多次元シミュレーションが必要である。そこで我々は銀河団プラズマの熱的安定性を調べるため、放射冷却と熱伝導を含めた2次元MHDシミュレーションを行なった。

2. Simulation model

我々は放射冷却と熱伝導を含む2次元散逸性MHDコードを用いてシミュレートした。座標系はカーテシアン座標とし、長さ、速度、密度、時間のユニットは、 $r_0 = 15\text{ kpc}$ 、 $v_0 = 790\text{ km s}^{-1}$ 、 $\rho_0 = 5 \times 10^{-27}\text{ g cm}^{-3}$ 、 $t_0 = r_0/v_0 = 2 \times 10^7\text{ yr}$ とした。計算領域は、 $900\text{ kpc} \times 900\text{ kpc}$ 、メッシュ数は、 1024×1024 である。熱伝導は、磁力線方向にのみ伝わる非等方熱伝導を用いている。放射冷却は熱制動放射を仮定する。電気抵抗モデルには、太陽フレアの計算で採用されている異常抵抗モデルを用いる。

乱流磁場中の銀河団プラズマの熱的安定性を調べるため、まず、銀河団の重力ポテンシャル中を運動する磁気圏を持つサブクランプをシミュレートし、銀河団全体に弱い磁場を形成する。このとき熱伝導と放射冷却は無視する。乱流磁場形成後を初期状態として熱伝導と放射冷却を含めてシミュレートする。計算モデルは、熱伝導と放射冷却を含めたmodel M I、放射冷却のみを含めたmodel M II、熱伝導のみを含めたM III、両者を含めて磁場のないmodel Hの4つである。

3. Simulation results

Fig. 1は、 $t = 0.4\text{ Gyr}$ でのmodel M I(上図)とmodel M II(下図)の温度分布を示す。それぞれ、サブクランプの運動に励起された乱流磁場を持つ。Model M IIでは、放射冷却の効果により高密度の銀河団コアの温度は下がる。一方、Model M IIでは、熱伝導の効果により初期の温度勾配は均される。Fig. 2は、model M I、M II、M III、Hの最低温度(コアの温度)の時間発展を示す。Model M IIでは急速に温度が下がるのに対して、model M Iでは熱伝導の効果により銀河団コアは加熱され、1Gyr以上保たれる。Model M IIIでは放射冷却の効果を無視しているので、コアは加熱され、その後ほぼ一様に保たれる。磁場を考慮しないModel Hでは等方的熱伝導の効果

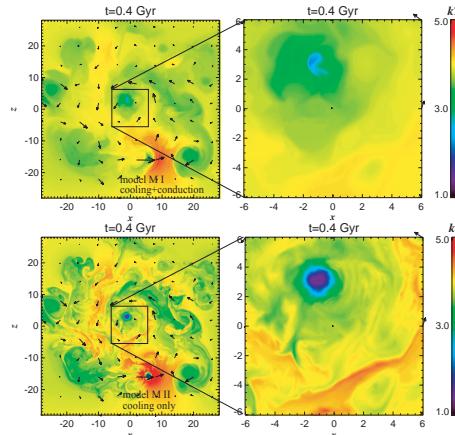


Fig. 1 Model M I (上図)と model M II (下図)の $t = 0.4\text{ Gyr}$ での温度分布。左図は全計算領域、右図はその中心部 ($180\text{ kpc} \times 180\text{ kpc}$) を示す。

により、磁場があるモデルよりも急速に温度勾配が均される。このモデルでは計算領域の温度分布はほぼ一様となり、低温と高温プラズマは共存できない。

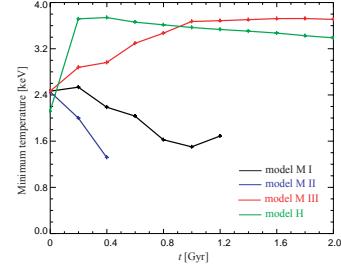


Fig. 2 銀河団コアの温度の時間発展。黒線、青線、赤線、緑線はそれぞれ、model M I、M II、M III、Hの結果を示す。

4. Summary and discussion

我々は乱流磁場存在下においてICMからの熱伝導がどのように中心部の放射冷却とバランスするかを調べた。Fig. 1とFig. 2で示したように、model M Iでは熱伝導の効果により銀河団コアの温度は、1Gyr以上保たれる。また、磁場による熱伝導抑制により低温と高温領域が存在する。ここで銀河団コアの冷却の抑制に対して磁場の効果を考察する。銀河団コアが冷却により収縮することにより中心部での磁気圧が強まるはずである。そのとき、磁気圧によりコアの収縮が抑制されたり、乱流磁場の収縮は磁気リコネクションを起こしコアが加熱されたりする可能性がある。